

Siirtymä- ja huokospaine- mittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset

10.3.2011

Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset

Liikenneviraston ohjeita 6/2011

ISSN-L 1798-663X
ISSN 1798-663X
ISBN 978-952-255-640-0

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-663X
ISSN 1798-6648
ISBN 978-952-255-641-7

Kopijyvä Oy
Kuopio 2011

Ohje saatavissa Liikenneviraston www-sivuilta osoitteista:

http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/fi/palvelut/tietopalvelut/liikenneviraston_ohjeita2011

http://alk.tiehallinto.fi/thohje/ohjeluettelo_alku2.htm

Liikennevirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelin 020 637 373

Taitorakentaminen

Vastaanottaja
ELY-keskusten Liikenne- ja infrastruktuuri
- vastuualueet,
Liikenneviraston investointi- ja
kunnossapitotoimialat

Säädöspäätös
Maantielaki 109 §

Korvaa/muuttaa
TYLT: Yleiset perusteet - Kohdat 61-64 / - 2000.

Kohdistuvuus
Tiehallinto

Voimassa
1.4.2011 - toistaiseksi

Asiasanat

pohjarakenteet, pohjarakennus, painumaletku, painumalevy, inklinometri, huokospainemittaus, takymetri, painuma, sivusiirtymä, huokospaine

Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset

Tässä ohjeessa esitetään siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset. Nämä menetelmät ovat yleisimmin väylien pohjarakenteiden suunnittelussa, tekemisessä ja käytössä tarvittavia mittausmenetelmiä. Harvemmin käytettävistä mittausmenetelmistä saa tietoa laitevalmistajilta.

Mittauksia tarvitaan sekä suunnitteluvaiheen että rakentamisvaiheen aikana. Suunnitteluvaiheen mittaukset voi olla tarpeen aloittaa hyvissä ajoin ennen kuin varsinainen suunnitelman laadinta alkaa. Menetelmiä käytetään tarvittaessa myös käytön aikaiseen pohjavahvistusten ja rakenteiden siirtymien ja ympäristön seurantaan. Mittausten käyttömahdollisuuksia kuvataan tarkemmin menetelmäkohtaisissa suunnitteluohjeissa ja työn laatuvaatimuksissa (InfraRYL).

Yksikön päällikkö
Taitorakentaminen


Antti Rytönen

Geoasiantuntija


Pentti Salo

LISÄTIETOJA

Pentti Salo

Liikennevirasto, Taitorakentaminen
puh. 020 637 373

Liikennevirasto

PL 33
00521 HELSINKI

puh. 020 637 373
faksi 020 637 3700

kirjaamo@liikennevirasto.fi
etunimi.sukunimi@liikennevirasto.fi

www.liikennevirasto.fi

LIITE	Ohjejulkaisu
TIEDOKSI	<p>Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL</p> <p>Rakennusteollisuus RT</p> <p>Infra ry</p> <p>Suomen Kuntaliitto</p> <p>Tekniset yliopistot/korkeakoulut ja ammattikorkeakoulut</p> <p>VTT</p> <p>Tie- ja geokonsultit</p> <p>Ohjeen laatijat ja työhön osallistuneet asiantuntijat</p> <p>Liikenneviraston kirjasto</p> <p>Rakennuttamisosaston ja Väylätekniikkaosaston yksiköt</p> <p>Liikenneviraston ja ELY-keskusten geoasiantuntijat</p>

Esipuhe

Ohjeen laatimista varten perustettiin syksyllä 2010 työryhmä, johon ovat kuuluneet ohjeen kirjoittaja Antti Junnila Innogeo Oy:stä sekä tilaajan edustajina Pentti Salo ja Tiina Perttula. Luvun 5 osalta on sivukonsulttina toiminut Teemu Riihimäki Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Varsinaiseen ohjetekstiin kuulumattomat selittävät lisäykset on esitetty kursiivilla.

Helsingissä maaliskuussa 2011

Liikennevirasto
Taitorakentaminen

Sisältö

1	JOHDANTO	7
1.1	Ohjeen soveltamisala	7
2	PAINUMAMITTAUKSET	8
2.1	Painumamittausmenetelmät	8
2.2	Painumatarkistin	8
2.3	Nykyisten penkereiden painumaseuranta	10
2.4	Painumaletku	10
2.5	Suosituksia suunnitteluun	11
3	SIIRTYMÄMITTAUKSET	12
3.1	Siirtymämittaukset	12
3.2	Geodeettiset mittaukset	12
3.3	Inklinometrimittaus	12
3.3.1	Yleistä	12
3.3.2	Laitteisto ja mittaustavat	12
3.3.3	Mittaustulosten käsittely	13
3.3.4	Mittaustarkkuus ja virheriskit	13
3.3.5	Suosituksia suunnitteluun	14
4	HUOKOSPAINEMITTAUKSET	15
4.1	Huokospaineen mittaustavat	15
4.2	Huokospainemittarien asennus	17
4.3	Huokospainemittauksen virhelähteitä	18
4.4	Suosituksia suunnitteluun	18
5	PAALUJEN KOEKUORMITUS	19
5.1	Paalun koekuormitus	19
5.2	Iskuaaltomittaukset	19
5.2.1	Yleistä	19
5.2.2	Ehjyysmittaukset	19
5.2.3	Dynaaminen koekuormitus	20
5.3	Staattinen koekuormitus	22
	LÄHTEET	24

1 Johdanto

1.1 Ohjeen soveltamisala

Tässä julkaisussa esitetään painuma-, siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset sekä työnaikaisen mittausvaiheen että suunnittelun näkökulmasta.

2 Painumamittaukset

2.1 Painumamittausmenetelmät

Erityyppisiä painumamittausmenetelmiä ovat muun muassa:

- Painumatarkistin, asennetaan yleensä penkereen päälle
- Painumamittausnasta nykyisen tien päällysteessä
- Vaakasuora painumaletku
- Pystysuora painumaletku

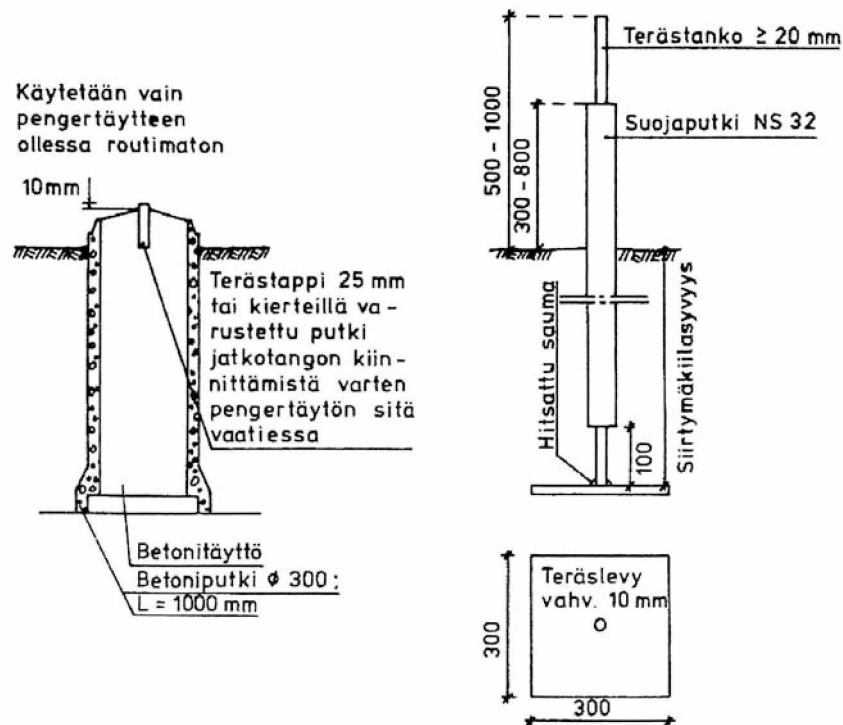
Mittausmenetelmän valinta riippuu hyvin tapauskohtaisesti odotettavissa olevan painuman suuruudesta, nopeudesta ja suunnitelmaratkaisun kannalta tarpeellisesta mitaustarkkuudesta. Jos suunnitelmassa ei ole esitetty tarkempaa vaatimusta, käytetään yleensä painumatarkistinta.

2.2 Painumatarkistin

Painumatarkistin voi olla kuvan 1 mukainen betoni- tai teräsrakenteinen tarkistin. Kuvassa esitettyjen rakenteiden lisäksi tarvitaan törmäyssuojus esimerkiksi kaivonrenkaasta tai puukehikosta, joka varustetaan mittauksesta kertovalla kyltillä.

Painumatarkistin soveltuu käytettäväksi erityisesti silloin, kun ei ole välttämätöntä saada tarkkaa tietoa pengerrystyön aikana tapahtuvasta painumasta, vaan tärkein tieto on painuman lakkaaminen. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi massanvaihtokohteet. Tällöinkin on luonnollisesti tarpeen asentaa mittarit mahdollisimman välittömästi pengerryksen jälkeen. Mitä tärkeämpää on saada selville penkereen kokonaispainuma, jotta sitä voidaan verrata laskettuun painumaan ja näin tarkkailla painumalaskelmien ja suunnitelmaratkaisun onnistumista, sitä vakavammin joudutaan harkitsemaan myös muiden painumamittausmenetelmien käyttöä.

Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset



Kuva 1. Painumatarkistin

Kuvan 1 oikeanpuoleinen painumamittarityyppi soveltuu kokonaispainuman mittamiseen matalahkoilla pengerkorkeuksilla esimerkiksi pystyjoituskohteissa, kun pohjalevy sijoitetaan tasatun pohjamaan tai ojituserroksen päälle. Mittaustankoa joudutaan varomaan pengerrytyötä tehtäessä ja usein mittareita tuhoutuu. Tankoa ja suojaputkea voidaan jatkaa pengerryksen edetessä, mutta korkeilla penkereillä hankaluus joka tapauksessa kasvaa. Ihanteellisissa olosuhteissa päästään 1 mm mittaus-tarkkuuteen, mutta esimerkiksi levyn kallistuminen taikka tangon taipuminen heikentää tarkkuutta.

Maahan kierrettäviä painumamittareita voidaan käyttää nykyisillä penkereillä. Mittareissa on halkaistu maahan pureutuva halkaisijaltaan noin 300 mm teräslevy. Menetelmä soveltuu erityisesti ratapenkereisiin. Tiepenkereen ollessa kyseessä on liikenneturvallisuussyistä vältettävä maanpinnalla törröttäviä mittaustankoja. Penkereen kivisyys on usein esteenä menetelmän käytölle.

*Jyväskylän Rantaväylän Aholaidan eritasoliittymässä käytettiin onnistuneesti painumamittaustapaa, jossa noin 0,8 m * 0,8 m teräslevy jätettiin maanpinnalle pengerrystä aloitettaessa ja etsittiin pengerrysvaiheiden jälkeen porakonekalustolla ja asennettiin painumamittaustanko suojaputkineen. Koska painumat olivat suurehkoja (700-1100 mm), ei levyn mahdollinen kallistuma pengerryksestä taikka porakoneesta haitannut mittaus-tarkkuutta. Ratkaisuun ajoi suuri pengerkorkeus (7-10 m) ja painumien nopeus enimmäkseen silttisellä maapohjalla, jolloin pengerrysvaiheessa tapahtuvan painuman suuruus oli tärkeä.*

2.3 Nykyisten penkereiden painumaseuranta

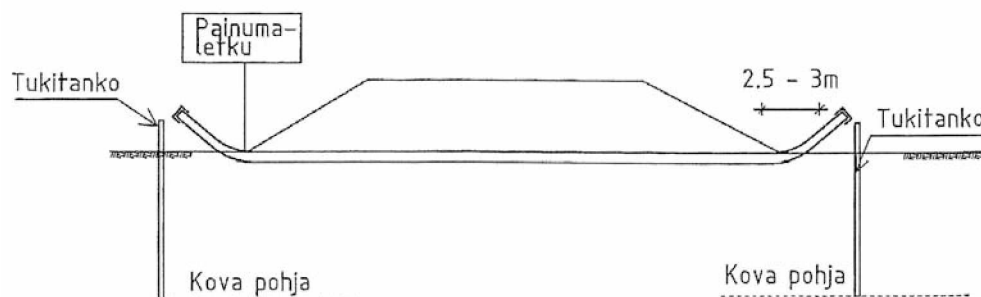
Yksinkertainen mittaustapa on tienpäälysteeseen kiinnitettävä nasta, jonka painumaa voidaan seurata. Mittaustarkkuus on noin 2 mm. Suurin hankaluus on tien uudelleenpäälystämisen, jolloin uudet nastat tulisi asentaa välittömästi, jotta painumasta saadaan käytännössä jatkuva havainto. Uudelleenpäälystämistä aiheutuvan häiriön minimoimiseksi nastat on edullisinta sijoittaa pientareelle.

Maahan kierrettäviä painumamittareita (ks. kohta 2.2) voidaan käyttää nykyisillä penkereillä.

Liikenneviraston julkaisu 22/201 (Luomala, H. Ratapenkereiden monitorointi) esittelee ratapenkereiden monitorointia, mm. painumamittauksia.

2.4 Painumaletku

Painumaletkumittaus (kuva 2) perustuu hydrostaattiseen paineeseen. Letku asennetaan tarkasteltavaan penkereeseen, useimmiten poikkisuuntaan ja täytetään nesteellä. Mittaus voidaan tehdä joko kiinteillä taikka liikuteltavilla antureilla, jotka mittaavat ko. kohdalla vallitsevan hydrostaattisen paineen.



Kuva 2. Painumaletku

Painumaletkua käytetään painumatarkistimien antaman tiedon täydentämiseen, kun on tarpeen selvittää painumaprofiili penkereen poikkisuunnassa taikka lyhyillä osuuksilla penkereen pituussuunnassa.

Letkun materiaalina käytetään yleensä halkaisijaltaan 63 mm muoviputkea (PELM PN 10, jossa seinämä 5,8 mm tai PE-HD PN 10, jossa seinämä 4,7 mm), pienten painumien tapauksessa käy myös halkaisijaltaan 50 mm muoviputki (PELM PN 10, jossa seinämä 4,6 mm). Letkussa ei saa olla jatkoksia.

Letku ulotetaan 2-3 m luiskan ulkopuolelle. Letku asennetaan tasaiselle kivettömälle maapohjalle mahdollisimman suoraan, tarvittaessa n. 100 mm hiekkakerrosta tauserroksena käyttäen. Letkuun vedetään nailonnaru mittaasanturia varten. Letku ankuroidaan maahan lyötävin harjateräskoukuin. Letkun yläpinta vaaitaan 1 m välein ja letku peitetään tämän jälkeen 200 mm hiekkakerroksella, jonka päälle vielä tehdään 500 mm suojatäyttö kivettömästä maasta. Letkun päät nostetaan loivasti ylös maasta ja tulpataan. Letkun pään viereen lyödään maahan mittauksen peruskorkeutena toimiva tukitanko, joka ulottuu 1-1,5 m korkeuteen maanpinnasta.

**Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä
paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset**

Mittaasanturi voi olla joko painetta ilmanpaineen suhteen mittaava taikka absoluuttista painetta mittaava. Ilmanpaineen suhteen mittaavan etuna on ilmanpaineen vaikutuksen automaattinen eliminoituminen. Haittapuolena on, ettei ko. tyyppisiä antureita voida sijoittaa useita yhteen painumaletkuun. Absoluuttista painetta mittaavia antureita voidaan sijoittaa useita samaan letkuun, mutta mittaushetken ilmanpaine on tunnettava ja vähennettävä painehavainnoista.

Painumaletkumittausten tarkkuutena on yleensä pidetty 10 mm. Virhelähteitä ovat letkun asennustyön epätarkkuudet, o-vaaituksen epätarkkuudet ja liikuteltavan anturin mittausepätarkkuudet. Kiinteillä automatisoiduilla antureilla viimeksi mainittu virhe pienenee. Letkumittausten huonona puolena on myös letkujen vaurioitumisriski erityisesti painumien ja painumaerojen ollessa suuria.

2.5 Suosituksia suunnitteluun

Nykyisten penkereiden painumaseurannan aloittaminen jo hyvissä ajoin ennen toteutukseen tähtäävän suunnittelun aloittamista on saatava toimimaan tämänhetkistä varmemmin. Tällaisia tapauksia ovat varsinkin:

- Levennettävät ja parannettavat tiet, myös sellaiset, jotka ovat jäämässä ilman erityisiä toimenpiteitä, kuten esimerkiksi nykyinen tie, joka jää tulevan kaksiajorataisen tien toiseksi ajoradaksi.
- Tiet, jotka ovat vielä painuvassa tilassa tai joiden painumatilasta ei ole tietoa.
- Painumatiedoista on hyötyä suunnitelmaratkaisujen valinnassa.
- Hankintamallista aiheutuvat näkökohdat vaativat lähtötietoriskien pienentämistä.

Rakentamisen aikaisten painumamittaushavaintojen tarpeellisuudesta erilaisia suunnitteluratkaisuja varten voidaan todeta:

- Pystyjoituksen yhteydessä välttämätön työkalu ylipengerkuormituksen ohjaamiseen. Sama, joskin vähemmän riskialtis tilanne on myötäävissä syvästabiloinneissa.
- Pohjaantäytöissä välttämätön ratkaisun onnistumisesta varmistumiseksi.
- Esikuormitusten (esimerkiksi silttimaalla taikka matalilla savikoilla) yhteydessä välttämätön esikuormituksen ohjaamiseen ja ratkaisun onnistumisesta varmistumiseen sekä mahdollisen pengerkevennyksen mitoittamiseen. Yksinkertaisissa tapauksissa voidaan painumien pysähtymisestä päätellä myös huokosveden ylipaineen aleneminen.
- Useissa tapauksissa tarpeellinen varmistuskeino kaivamalla tehtävien massanvaihtojen (varsinkin syvien) taikka kimmoisten syvästabilointien (varsinkin nopeasti esikuormitettavien) tapauksissa.

Painumamittaustulosten graafisessa käsittelyssä tulee ottaa huomioon mittakaavan valinta aika-painuma-kuvaajissa. Kun aika-akselilla käytetään ajan neliöjuurta, tulee painumien hidastumisen ja päättymisen arviointi huomattavasti havainnollisemmaksi.

3 Siirtymämittaukset

3.1 Siirtymämittaukset

Siirtymämittauksilla määritetään betoni-, maa- tms. rakenteen vaakasuuntaisia siirtymiä. Mittausmenetelmä on joko geodeettinen mittaus, kun riittää siirtymien mittaaminen maan pinnalta, tai inklinometrimittaus, kun tarvitaan tarkempaa tietoa syvemmällä tapahtuvista maanpinnan siirtymiä suuremmista siirtymistä.

3.2 Geodeettiset mittaukset

Geodeettisissä mittauksissa määritetään maan pinnalla sijaitsevan tarkkailupisteen sijainti yhteen tai useampaan kiintopisteeseen nähden. Tällöin mitataan tarkkailupisteen ja kiintopisteiden välimatkat ja suuntakulmat. Geodeettisissä mittauksissa käytetään sellaista mittausmenetelmää, jolla saadaan laatuvaatimuksissa esitetty mittaustarkkuus. Yleissuosituksena voidaan esittää, että on pyrittävä vähintään 5 mm mittaustarkkuuteen. Jos siirtymiä mitataan betonirakenteeseen kiinnitetystä pultista, mittaustarkkuudeksi saadaan 1-2 mm. Jos siirtymiä mitataan tien päällysteeseen kiinnitetystä mittausnastasta, tarkkuudeksi saadaan 2-4 mm.

Geodeettiset mittaukset voidaan tehdä myös robottitakymetrillä. Tällöin mittauksen kiinteä kustannus nousee huomattavasti. Toisaalta saatava mittaustulos on inklinometrimittauksiin verrattuna kuitenkin useimmissa tapauksissa vaatimaton.

3.3 Inklinometrimittaus

3.3.1 Yleistä

Inklinometrillä voidaan mitata maassa tai paalussa tai vaikkapa tukiseinässä olevan putken tai reiän kaltevuuksia eri syvyyksillä. Mittaustulosten avulla voidaan määrittää putken taipumaviiva. Eri ajankohtien taipumaviivoja vertaamalla voidaan määrittää putken ja sitä ympäröivän maamassan liike mittausajankohtien välillä.

3.3.2 Laitteisto ja mittaustavat

Inklinometrimittaukset voidaan tehdä joko liikuttamalla kulmanmittausanturia inklinometriputkessa (vanha klassinen tapa) taikka automaatti-inklinometrimittauksena, jolloin putkeen sijoitetaan kiinteästi useita kallistusantureita ja näistä saadaan jatkuvaa mittausdataa paikan päällä käymättä. Viimeksi mainittu menetelmä on huomattavasti yleistynyt viimeksi kuluneiden 5-10 vuoden aikana ja vaikuttaa olevan syrjäyttämässä vanhanaikaisemman mittaustavan. Automaatti-inklinometrin mittaustulosten lähetystiheyttä voidaan helposti säätää työn aikana.

Inklinometriputki (oltava taipuisa) asennetaan yleensä suojaputkea käyttäen, varsinkin jos joudutaan läpäisemään karkearakeisia tai kovia maakerroksia. Putki ulotetaan niin syvälle, että sen alapään voidaan olettaa olevan liikkumaton. Putkeen mahdollisesti kertyvän veden jäätyminen on estettävä esimerkiksi pakkasnesteillä. Mittaus

**Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä
paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset**

putkessa voidaan tehdä kahdessa eri suunnassa (poikittain toisiaan vastaan). Putken suunta valitaan niin, että jompikumpi näistä suunnista on todennäköinen maksimi-siirtymien suunta. Vanhantyyppisessä inklinometrimittauksessa putken sisähalkaisija on yleensä 50 mm. Automaatti-inklinometriputket ovat pienempiä, ulkohalkaisija noin 25 mm.

Vanhantyyppisessä inklinometrimittauksessa lasketaan kaapeliin kiinnitetty kulmanmittausanturi putken pohjalle, odotetaan anturin ja putken lämpötilaerojen tasaantumista ja nostetaan anturia ylöspäin tehden mittaukset useimmiten 1 m välein, mutta tiheämpikin mittausta on mahdollinen. Kun anturi on nostettu putken yläpäähän, sitä käännetään 180 astetta ja se lasketaan takaisin putken pohjalle ja ylösnostettaessa mitataan uudestaan. Mittaustulosten keskiarvoa käytetään putken sijainnin määrittelyyn. Tämän jälkeen mitataan vastaavalla tavalla putken taipuma ensin mitattua suuntaa vastaan poikittain.

Automaatti-inklinometrimittauksessa kallistusanturit sijoitetaan yleensä 1 m välein.

3.3.3 Mittaustulosten käsittely

Mitatuista kaltevuusarvoista lasketaan putken poikkeama pystysuorasta suunnasta alhaalta ylöspäin molemmissa mitatuissa toisiaan vastaan kohtisuorissa suunnissa. Tulokset piirretään taipumaviivoiksi. Vertaamalla taipumaviivan sijaintia o-mittaukseen ja edellisten mittauskertojen tuloksiin voidaan selvittää putken ja maan liikkeet eri syvyyksillä.

Automaattimittaustulosten käsittelyssä periaate on sama.

3.3.4 Mittaustarkkuus ja virheriskit

Inklinometrilaitteiston mittaustarkkuudeksi voidaan arvioida 2 mm ja käytännön tarkkuudeksi on Suomessa yleensä oletettu 2-5 mm. Suurilla putkenpituuksilla epätarkkuus saattaa kasvaa. On todettu laajan mittaustarkkuusaineiston perusteella (Durham Geo 2010), että epätarkkuus kasvaisi suhteessa putkipituuteen ja olisi esim. 2,5 mm 10 m putkelle.

Mittaustarkkuuteen 2-5 mm pääseminen edellyttää ehdottomasti, että putken alapää on hyvin kiinnitettynä kalliossa tai tiiviissä moreenissa. Jos putken alapään kiinnitys sallii liikettä, tarkkuus huononee noin 10-30 mm:iin. Jos putken alapäätä ei saada liikkumattomaksi, mitataan inklinometrimittausten yhteydessä putken yläpään koordinaatit. Tämä hankaloittaa automatisoituja mittauksia ja hankaluus voidaan kompensoida putken yläpään mittauksen automatisoinnilla, mikä lisää kustannuksia.

Käsitteilyssä inklinometreissä lämpötilaerot vuodenaikojen välillä ovat epätarkkuutta lisäävä tekijä.

Putken liikkuminen porareian suhteen heikentää mittaustarkkuutta. Erityisesti veden virtaus putken ympärillä (pintavesi, paineellinen pohjavesi) ovat riskitekijöitä. Paineellisen pohjaveden tapauksissa putken ympärillä joudutaan tekemään bentoniitti-injektointi. Hiekkatäyttö ei toimi riittävän hyvin.

Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset

Ratapenkereissä voi junakuorma aiheuttaa inklinometriputkeen siirtymiä, jotka eivät ole yhtäpitäviä maan liikkeiden kanssa.

Automaatti-inklinometrimittauksissa voi syntyä satunnaisia bittivirheitä. Tulosten loogisuus on tarkistettava ja monissa tapauksissa virhe on tasasuuruinen ja mahdollinen korjata.

3.3.5 Suosituksia suunnitteluun

Inklinometrimittausten tarve ja mittauspisteiden sijoitus esitetään suunnitelmassa. Inklinometriputket pitää aina asentaa hyvissä ajoin ennen siirtymiä aiheuttavia rakennustoimenpiteitä, jotta alkutilanne saadaan mitatuksi. Erilaisia inklinometrimittausten käyttötilanteita ovat muun muassa seuraavat:

Paalutuksen yhteydessä sen tarkkailu, aiheuttaako paalujen lyönnistä stabiliteetin haitallista alenemista ja sivusiirtymistä johtuvaa vaurioitumisvaaraa esimerkiksi paalutukselle itselleen, siltarakenteille, ranta- tai kaivantoluiskille taikka muille läheisyydessä sijaitseville rakenteille. Mittausten tavoitteena on määrittää, voidaanko työtä jatkaa aikaisempaan tapaan, vai onko työtä hidastettava taikka ryhdyttävä muihin toimenpiteisiin stabiliteetin varmistamiseksi. Sopivien hälytysrajojen arviointiin ei ole yksiselitteisiä ohjeita. Tyypillisesti sivusiirtymiä voidaan sallia esimerkiksi 30-60 mm, mutta kokonaissiirtymä ei ole läheskään aina kriittinen, vaan esimerkiksi liukupinnan kehittymisestä kertova paikallinen kulmanmuutos taikka kahden mittauskeran välinen siirtymäero. Mittauksia tehdään paalutustyön aikana useita kertoja työvuoron aikana.

Syvästabiloinnin yhteydessä voi esiintyä vastaavanlaisia tilanteita kuin paalutuksen yhteydessä. Yleensä häiriintyminen on stabiloinnin yhteydessä lievempää ja nopeammin palautuvaa.

Pengertä esikuormitettaessa voidaan inklinometrimittauksin varmistaa, että esikuormitus saadaan painumia optimaalisimmin nopeuttavaksi, kun inklinometrimittaus kertoo aivan pieniä sivusiirtymiä tapahtuvan. Tällaiseen voidaan inklinometria käyttää esimerkiksi pystyjoituksen yhteydessä. Esikuormituksen seurannassa riittävät viikottaiset inklinometrimittaukset.

Kaivanto- tai leikkausluiskien yläpuolella sijaitsevien varottavien rakenteiden siirtymiä voidaan tarkkailla inklinometrimittauksin. Sallittu siirtymä on yleensä erittäin pieni. Mittaukset tehdään päivittäin, erityisesti kun luiskan läheisyydessä tehdään rakennustöitä.

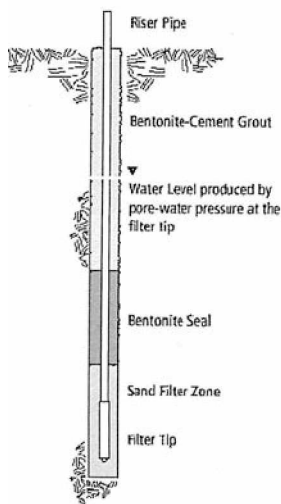
4 Huokospainemittaukset

4.1 Huokospaineen mittaustavat

Huokospaineen mittauslaitteistoja on esitetty SGY:n kairausoppaassa IV, Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen sekä Silke Savikurjen diplomityössä. Huokosvedenpaineen mittaaminen tapahtuu joko avointa tai suljettua mittaustapaa käyttäen. Avoin mittaustapa soveltuu maakerroksiin, joiden vedenläpäisevyys on hyvä. Tällaisissa olosuhteissa huokospainemittari toimii kuten pohjavesiputki. Hienora-keisissa maalajeissa, kuten savissa ja silteissä, maan vedenläpäisevyys on huono ja huokosvedenpaine mitataan suljettuja järjestelmiä käyttäen.

Standpipe-tyyppistä huokospainemittaria (Casagrande piezometer) voidaan käyttää silttisissä taikka karkeammissa maissa, mutta se ei sovellu nopeiden painemuutosten seurantaan eikä yksinkertaisena mekaanisena laitteena myöskään automatisoituun seurantaan.

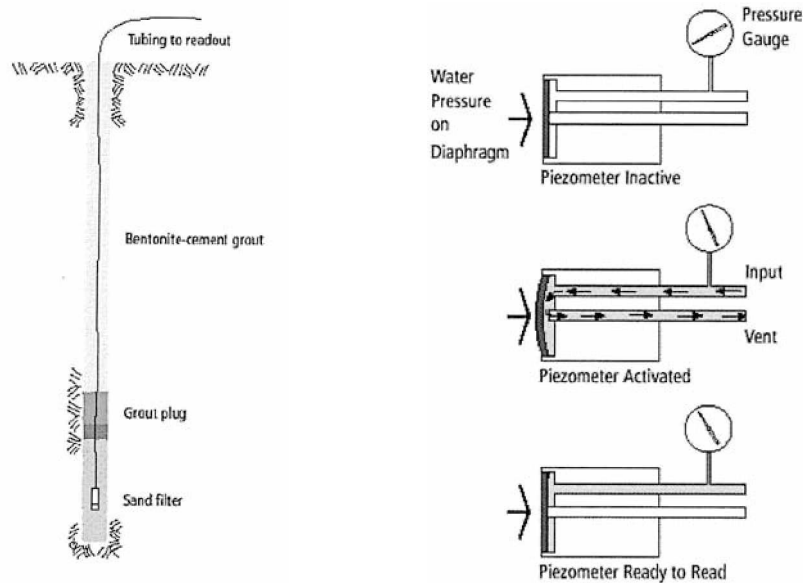
Standpipe-huokospainemittari (kuva 3) koostuu nousuputkesta ja siihen kiinnitetystä suodatinpäästä. Porausreiän ja nousuputken välinen tila täytetään bentoniitti-injektointilaastilla, jotta veden pystysuuntainen virtaus estetään. Vedenkorkeus mitataan manuaalisesti sondilla, joka lasketaan mittakaapelin tai nauhan avulla vedenpintaan. Sondin osuminen vedenpintaan havaitaan sähköisesti.



Kuva 3. Standpipe-huokospainemittari

Pneumaattinen huokospainemittari (kuva 4) perustuu taipuisaan välikalvoon, jonka ulkopuolella vaikuttaa vedenpaine ja sisäpuolella kaasunpaine. Mittari on yhdistetty kaksoisputkeen. Mittaus suoritetaan siten, että menoputkeen syötetään kaasua kasvavalla paineella, kunnes kalvo taipuu ja kaasu pääsee virtaamaan paluuputkeen ja vastaava paine mitataan pneumaattisella mittarilla.

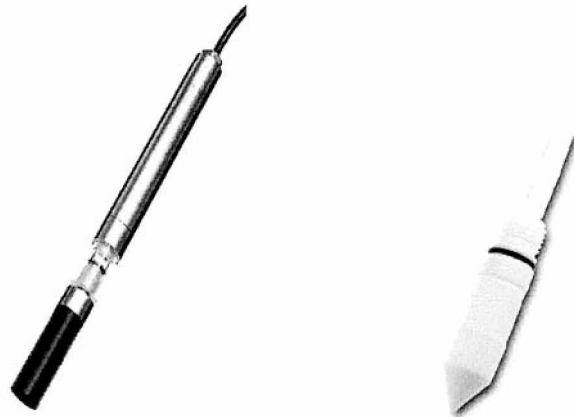
Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset



Kuva 4. Pneumaattinen huokospainemittari

Huokospaineanturi on sähköinen mittaustapa ja soveltuu automatisoituun seurantaan. Huokospainekärkien sisällä on kalvo, joka taipuu paineen vaikutuksesta. Taipuman suuruus mitataan kalvoon kiinnitetyillä venymäliuskoilla. Venymä muutetaan huokosvedenpaineeksi kalibrointikaavan avulla.

Suomessa varsin yleisesti käytetty BAT-huokospainemittari (kuva 5) koostuu mittapäästä ja suodatinpäästä. Mittapää sisältää anturin lisäksi AD-muuntimen, mikroprosessorin, kellon, verkko-ohjaimen, ja muistipiirin. Suodatinpään perusmalli on valmistettu polyasetaalimuovista ja suodatinosa huokoisesta polyetyleenistä. Suodatinpää asennetaan pysyvästi halutulle syvyydelle. Suodatinpäässä on kiinnitetty putki, johon anturipää lasketaan mittauksen yhteydessä. Mittaus voidaan tehdä joko manuaalisesti tai jatkuvasti. Manuaalisessa mittauksessa mittauspää lasketaan putkea pitkin suodatinpäähän ja kiinnitetään siihen pikaliittimellä. Mittausarvon vakiintuminen kestää muutamasta sekunnista kymmeneen minuuttiin ja sen jälkeen lukema voidaan mitata ja siirtyä mittaamaan seuraavaa suodatinpäästä. Jatkuvassa mittauksessa mittauspää yhdistetään suodatinpäähän pitkäaikaisesti ja mittausdata siirretään kaapeli- välityksellä. Mittareita on eri painetasoja varten ja on syytä valita sellainen, joka antaa mahdollisimman hyvän mittaustarkkuuden kulloisissakin olosuhteissa.



Kuva 5. BAT-huokospainemittari. Vasemmalla mittapää, oikealla suodatinpää.

Värähdyslankahuokospainemittari (vibrating wire piezometer) on sähköinen ja automatisoituun seurantaan soveltuva menetelmä. Mittarissa vedenpaine muutetaan taa-juussignaaliksi välikalvon, jännitteisen teräslangan ja sähkömagneettikelan avulla. Välikalvoon kohdistuvan paineen muutos muuttaa teräslangan jännitystä. Sähkömagneettikelan virittämä lanka värähtelee ominaistaajuudellansa ja aiheuttaa taa-juussignaalin, joka kalibrointikertoimien avulla muutetaan huokosvedenpaineeksi.

4.2 Huokospainemittarien asennus

Huokospainekärjet voidaan asentaa esimerkiksi monitoimikairakalustolla. Pengertä tai muita täyttöjä läpäistäessä käytetään porauskalustoa. Työsaavutukseksi voidaan arvioida helppoissa olosuhteissa 5-10 huokospainekärkeä työvuorossa. Reikä tulee täyttää vedellä ja, jos vesi ei pysy reiässä, käytetään työputkea.

Huokoskärkien asennuksen yhteydessä ei saa muodostua pystysuuntaisia hydraulisia yhteyksiä sellaisten maakerrosten välille, joissa vedenpaineolosuhteet ovat erilaiset. Mahdolliset hydrauliset yhteydet suljetaan sopivin tiivistein (esim. bentoniitti). Samoin on sopivalla tiivisteellä estettävä pintavesien valuminen järjestelmään.

Pohjaveden nousuputkeen perustuvissa mittauksissa nousuputken on oltava riittävän ohut. Putken tai letkun yläpää maanpinnalla suojataan vaurioitumiselta.

Huokoskärki ja siihen liittyvät letkut täytetään ennen asennusta vedellä. Hienorakeisesta, esim. sähköisestä, huokospainekärjestä poistetaan ilma keittämällä sitä yli 10 minuuttia. On myös käytetty tyhjiömenetelmää. Huokoskärjen ja putkien tai letkujen liittäminen toisiinsa tehdään veden alla ja asennusvaiheessa estetään huokoskärjen kuivuminen esim. pitämällä huokoskärki vedellä täytetyssä muovipussissa, joka maahan työnnettäessä reiässä veden alla lähtee pois.

4.3 Huokospainemittauksen virhelähteitä

Huokoskärkien ilmaamisen epäonnistuminen on merkittävä virheriski.

Erilaisten maakerrosten välisten hydraulisten yhteyksien syntyminen taikka pintavesien valuminen järjestelmään voivat aiheuttaa harhaanjohtavia tuloksia.

Kalibrointivirheet taikka liian harvoin toistuva kalibrointi aiheuttavat epätarkkuuksia. Erityisesti sähköisiä huokoskärkiä asennettaessa voi liian raju työtapo aiheuttaa niin suuria asennuksenaikaisia hetkellisiä huokospaineita, että aiheutuu palautumattomia kalibrointivirheitä.

4.4 Suosituksia suunnitteluun

Huokosvedenpainemittausten tarve ja mittauspisteiden sijoitus esitetään suunnitelmassa. Suositeltavaa on tarkastella tapaukseen sopivalla tarkkuudella työnaikaisen huokosvedenpaineen hälytysrajoja, mutta hälytysrajojen liian ehdoton lukkoonlyöntivaatimus ei yleensä ole mielekästä, vaan työnaikaisia tilanteita on syytä arvioida suunnitelman laatijan geoteknistä asiantuntemusta käyttäen. Erilaisia huokosvedenpainemittausten käyttötilanteita ovat muun muassa seuraavat:

Paalutuksen yhteydessä sen tarkkailu, aiheuttaako paalujen lyönnistä aiheutuva huokosvedenpaineen nousu ja maan häiriintyminen stabiliteetin haitallista alenemista ja sivusiirtymistä johtuvaa vaurioitumisvaaraa esimerkiksi paalutukselle itselleen, silta-rakenteille, ranta- tai kaivantoluiskille taikka muille läheisyydessä sijaitseville rakenteille. Mittausten tavoitteena on määrittää, voidaanko työtä jatkaa aikaisempaan tapaan, vai onko työtä hidastettava taikka ryhdyttävä muihin toimenpiteisiin stabiliteetin varmistamiseksi. Mittaukset tehdään tiheästi, vähintään päivittäin.

Syvästabiloinnin yhteydessä voi esiintyä vastaavanlaisia tilanteita kuin paalutuksen yhteydessä. Yleensä häiriintyminen on stabiloinnin yhteydessä lievempää ja nopeammin palautuvaa.

Pengertä esikuormitettaessa on erityisesti silttimaalla usein tarpeen mitata huokosvedenpainetta stabiliteetin ja optimaalisen esikuormituksen varmistamiseksi. Vaihtoehtoisena menetelmänä saattaa tapauksesta riippuen olla savisilla maalajeilla siipikairaus taikka silttisillä maalajeilla painumien pysähtymisen toteaminen. Huokosvedenpainemittaukset tehdään yleensä 2-4 kertaa kuukaudessa sekä välittömästi penkereen korotusten jälkeen.

Kaivanto- tai leikkausluiskien stabiliteetin varmistamisessa tarvitaan usein huokosvedenpainemittauksia. Mittaukset tehdään yleensä 2-4 kertaa kuukaudessa ja erityisesti syistä (sade, lumen sulaminen, rakennustyöt läheisyydessä) tiheämmin.

5 Paalujen koekuormitus

5.1 Paalun koekuormitus

Paalun koekuormitus voidaan tehdä joko dynaamisella tai staattisella menetelmällä.

5.2 Iskuaaltomittaukset

5.2.1 Yleistä

Iskuaaltomittaukset jaetaan dynaamiseen koekuormitukseen high strain- (PDA) ja ehjyysmittaukseen low strain- (SIT, PIT ja PET) menetelmällä. Low strain- menetelmää käytetään teräsbetonipaalun tai paikalla valetun kaivinpaalun ehjyyden arviointiin, jolloin iskuaalto aikaansaadaan kevyellä käsivasaralla. High strain- menetelmää käytetään paalun geoteknisen kestävyys- ja ehjyyden määrittämiseen, jolloin iskuaalto aikaansaadaan paalutuksessa käytettävällä lyöntilaitteella.

Iskuaaltomittaukset perustuvat 1-ulotteiseen iskuaaltoteoriaan. Mittaustulokseen vaikuttavat mm. vallitsevat maaperä- ja paalun materiaaliominaisuudet.

Paalun ominaisuuksista mittauksen kannalta tärkeimmät ovat poikkileikkauspinta-ala, pituus ja kimmomoduuli. Paalun ikä vaikuttaa teräsbetonisilla paaluilla paalun kimmomoduuliin.

Ennen mittaustyön aloittamista on mittaajalle toimitettava kohteen pohjatutkimustiedot ja paalutuspöytäkirjat. Paalutuspöytäkirjoista tulee ilmetä paalun numero, pituus, poikkipinta-ala sekä betonisilla paaluilla valuajankohta ja jatkosten sijainti. Paalun numero ja maahan jäävä pituus tulee kirjata ylös ja merkitä paaluun, jos paalu katkaistaan ennen iskuaaltomittausta. Mitatut signaalit tulee tallentaa myös käsittelemättöminä ja säilyttää ne raportin yhteydessä.

Dynaamisten kokeiden suorittamiseen ja tulosten tulkintaan riittävänä pätevyyden osoituksena voidaan pitää HSDPT-kokeen (High Strain Dynamic Pile Testing –test) suoritusta hyväksytysti tai muulla vastaavalla menettelyllä.

5.2.2 Ehjyysmittaukset

Ehjyysmittauksilla voidaan arvioida paalun ehjyyttä paalutuksen jälkeen. Testattavan paalun yläpäähän isketään kevyellä käsivasaralla, mikä aiheuttaa paaluun alaspäin kulkevan iskuaallon. Iskuaallon heijastumista mitataan paalun yläpäästä kiihtyvyyssanturilla, jolloin heijastuneen aallon muodosta on mahdollista tulkita muutokset paalun poikkileikkauksissa sekä halkeamat ja muut mahdolliset heikennykset paalussa. Paalua ympäröivä maaperä vaikeuttaa mittausten tulkintaa, koska vaippavastus näkyy myös mittaussaallossa. Mittaajan on ymmärrettävä maan ja paalun yhteistoiminta, jotta mittaustulosten tulkinta voidaan tehdä yksiselitteisesti. Yleensä kohteen paaluja on käsiteltävä kokonaisuutena, jolloin johtopäätökset yksittäisen paalun ehjyydestä on suhteutettava ympäröiviin paaluihin.

Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset

Ennen varsinaista mittausta on mitattavien paalujen päät tarvittaessa kaivettava esiin ja paalujen päät puhdistettava. Mittauskohdan tulee olla puhdas, kuiva ja ehjä. Rik-koutunut betoni ja mahdolliset maa-ainekset on poistettava ennen mittausta. Työ-maalla valettujen paalujen tulee olla vähintään 5 vrk ikäisiä ennen mittausta.

Ehjyysmittauksia suositellaan tehtäväksi vähintään paaluille, joiden painumat tai kallistumat jossain upotuksen vaiheessa poikkeavat muista kohteen paa-luista, jotka sijaitsevat pohjasuhteiltaan samanlaisella alueella.

Ehjyysmittauksilla on mahdollista havaita vain suuret vauriot. Menetelmää voidaan pitää käyttökelpoisena ja luotettavana ainoastaan esivalmistetuilla jatkamattomilla tai paikalla valetuilla paaluilla. Mikäli ehjyysmittaus low-strain menetelmällä ei onnistu, voidaan ehjyydet mitata high-strain menetel-mällä (PDA-mittaus).

Maan tiiviyyden vaihtelut, pohjaveden sijainti, paalun asennustapa, betonin laa-tu ja raudoitusmäärä vaikuttavat iskuaallon etenemiseen ja aallonnopeuteen, jonka vuoksi vertailumittauksia tehtävä aina.

Paalun ehjyysmittaus tehdään upotuksen päätyttyä. Mittaukset voidaan tehdä osit-tain paalutuksen kestäessä tai kokonaisuudessaan paalutuksen päätettyä kuitenkin siten, että mittauksissa rikkinäisiksi todetut paalut on mahdollista korvata uusilla paaluilla. Paalutussuunnitelma tarkistetaan mittaustulosten perusteella ja korvatta-vat paalut lyödään suunnitelmanmuutoksen osoittamiin paikkoihin. Ehjyysmittausten tulokset ja mahdolliset lyötävät lisäpaalut on esitettävä paalutuspöytäkirjoissa tai erillisissä mittausraporteissa.

Vaihtoehtona iskuaaltomittauksille paikalla valettujen kaivinpaalujen ehjyyden ja be-tonin laadun varmistamiseen voidaan käyttää ultraäänimittausta, jolla voidaan pai-kantaa paalun betonissa esiintyvät materiaaumuutokset tarkemmin kuin iskuaalto-mittauksilla.

5.2.3 Dynaaminen koekuormitus

Dynaaminen koekuormitus on kantavuuden suora määrittämismenetelmä. Sillä mää-ritetään ensisijaisesti paalun geotekninen kestävyys. Tämän lisäksi koekuormitukses-sa voidaan mitata tai laskea mittaustuloksista muun muassa paalun maksimi veto- ja puristusjännitys, paaluun lyönnissä siirtynyt energia sekä paalun yläpään siirtymä. Mittaustuloksista voidaan myös arvioida paalun ehjyyttä, lyönnin keskeisyyttä, paalu-tuskaluston tehokkuutta ja teräsbetonipaaluilla käytetyn iskusuojan kuntoa. Mittaus-tuloksista voidaan edelleen tehdä signaalinmallinnus-analyysi (esim. CAPWAP), jol-loin paalun vaippa- ja kärkivastuksen jakautuminen saadaan selville.

Yleisimmin paalun kantavuuden arviointiin Suomessa käytetään CASE -menetelmää. Käytettäessä paalun kantavuuden arviointiin CASE -menetelmää tulee raportissa sel-keästi kertoa, mitä CASE -menetelmän estimaattia on käytetty. Laskennassa käytetty vaimennuskerroin tulee esittää sekä tekstissä että graafisissa tulosteissa.

Arvioitaessa tukipaalujen geoteknistä murtokestävyyttä CASE-menetelmän RMX-estimaatin avulla, valitaan vaimennuskertoimen J_c arvoksi yleensä $\geq 0,5$. Kallioon ulottuvilla paaluilla, joilla iskuaalto aiheutetaan paaluun hydraul- tai paineilma-vasaralla, voidaan kuitenkin käyttää pienempää vaimennuskerrointa. Käytettäes-sä signaalinmallinnusta (esimerkiksi CAPWAP) määräytyy CASE-menetelmän

**Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä
paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset**

vaimennuskerroin tehdyn analyysin perusteella. Yksittäisen paalun signaalinmallinnuksen perusteella kalibroitua vaimennuskerrointa voidaan käyttää muiden kohteessa mitattujen paalujen RMX-estimaatin laskemisessa, mikäli paalujen käyttäytymiset asennuksen loppuvaiheessa vastaavat toisiaan.

Mitattaessa kierresaumattuja teräspaaluja tai suuriläpimittaisia $d > 400$ mm teräsbetoni- tai paikalla valettuja paaluja, on tarpeenmukaista mitata jännitys neljältä eri sivulta (neliömallinen poikkileikkaus joka sivulta ja ympyränmuotoinen poikkileikkaus neljästä kohdasta 90 asteen välein), jotta lyöntilaitteen isku saadaan keskitettyä hyvin.

Paalujen koekuormituksesta osa on mahdollisuuksien mukaan tehtävä koepaalutusvaiheessa tai paalutuksen alkuvaiheessa, jolloin mittaustulosten perusteella voidaan laatia / tarkentaa paalujen loppulyöntiehtoa. Paalun dynaaminen koekuormitus tehdään tukipaalulla loppulyöntien päätyttyä. Kitka- tai koheesiopaalulla koekuormitus tehdään määräsivyyteen upotuksen jälkeen. Mikäli halutaan käyttää hyväksi erityisesti vaippavastuksen kasvua maan lujuuden palaututtua paalutustyön jälkeen, suoritetaan koekuormitus jälkilyönneillä riittävän ajan kuluttua paalun asennuksesta.

Dynaaminen koekuormitus voidaan suorittaa myös eri paalutuskalustolla kuin itse paalun upotus.

Koekuormituskalusto ja pudotuskorkeus valitaan siten, että paaluun saadaan aiheutettua riittävän kova isku, jolla saadaan paaluun aikaan pysyvää painumaa, kuitenkin niin että paalu ei vaurioitu. Paalujen maksimijännitykset materiaaleista riippuen on esitetty standardissa SFS-EN 12699.

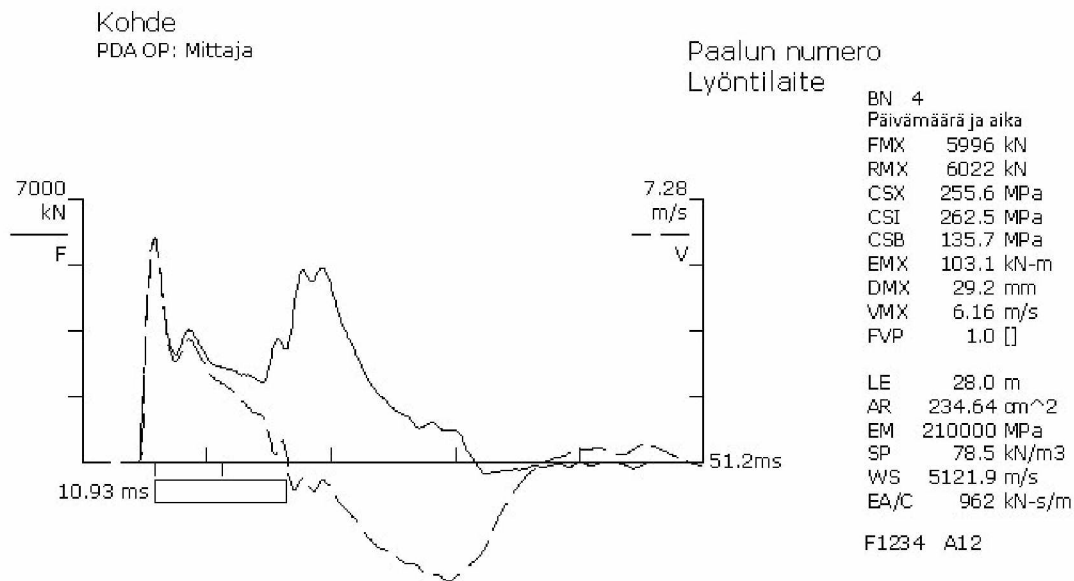
Paalun maan- tai vedenpinnan yläpuolisen osan tulee olla pituudeltaan riittävä, jotta mittaussanturit voidaan kiinnittää paaluun siten, etteivät ne kosketa maata ja rikkoudu paalutuksen aikana. Paalun pituus tulee mitoittaa siten, että koekuormituksessa paalun maan- tai vedenpäällinen pituus on vähintään kaksi kertaa paalun halkaisija tai sivumitta.

Mittaaja laatii koekuormituksen jälkeen mittausraportin, jossa tulee käydä ainakin seuraavat asiat:

- Kohteen nimi, paikka, rakennuttaja ja urakoitsija
- Lyhyt kuvaus rakennuspaikasta ja pohjasuhteista
- Tiedot kohteessa käytetyistä paaluista, kuten paalun tunnistenumero, tyyppi, halkaisija, seinämävahvuus sekä kärjen tyyppi
- Mittauksessa käytetty paalutuskalusto (järkele ja peruskone). Järkeleestä tulee mainita ainakin liikkuvan osan massa, maksimipudotuskorkeus mittauksissa käytetty pudotuskorkeus
- Dynaamisessa koekuormituksessa käytetty mittauslaitteisto ja mittausohjelman versio sekä mittajaan nimi ja yhteystiedot
- Kuvaus paalun asennuksesta ja töiden aikana havaituista ongelmista
- Perusteet paalun kimmomoduulin valinnalle ja käytetyn dynaamisen vaimennuskertoimen käytölle
- Paalun painuma, jousito ja paaluun siirtynyt energia koekuormitusiskulla
- Perusteltu arvio paalun geoteknisestä murtokestävyydestä ja ehjyydestä
- Lasketut minimi- ja keskiarvot koekuormitusten tuloksista

- Suositus tarpeellisen lisätiedon hankkimiseksi / jatkotoimenpiteiksi esimerkiksi loppulyöntisuositus tukipaaluilla ja paalupituussuositus kitka/koheesiopaaluilla

Laskennassa käytetyistä lyönnin signaaleista tulee raporttiin sisällyttää voima ja nopeus kuvaaja ajan suhteen (kuva 6). Suositeltavaa on lisäksi esittää kokonaislyöntivastuksen- ja staattisen vastuksen sekä siirtymän ja paaluun siirtyneen energian kuvaajat. Kuvaajista tulee käydä ilmi myös paalun impedanssi, paalun pituus antureiden alapuolella, käytettyjen mittausantureiden lukumäärä ja iskuaallon etenemisnopeus.

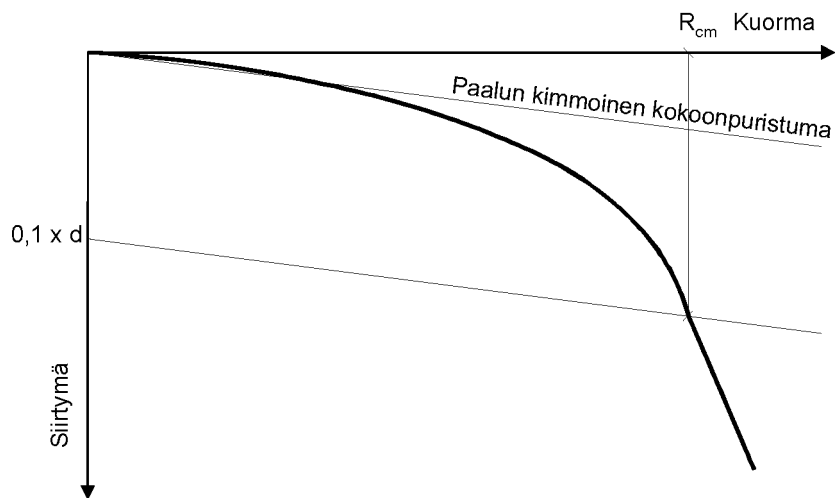


Kuva 6. Esimerkki PDA -mittausten tulostamisesta

5.3 Staattinen koekuormitus

Jos paalujen kantavuutta ei voida selvittää koepaalutuksen, vastaavista olosuhteista käytettävissä olevien staattisten tai dynaamisten koekuormitusten tai muiden tietojen perusteella luotettavasti, suoritetaan staattisia koekuormituksia. Paalun staattisessa koekuormituksessa tarvitaan vastapaino, hydraulinen sylinteri ja paalun painumamittauslaitteet. Vastapaino voidaan aikaansaada vetopaalujen tai staattisen kuorman avulla. Vastapainon kuormitus keskitetään paalulle palkiston avulla. Kuormitus saadaan aikaan hydraulisella sylinterillä (tunkilla), josta myös paalun kuormitus mitataan. Paalun yläpään painumista ja kallistumista mitataan mittakelloilla erillisen mittasillan suhteen. Staattinen koekuormitus tehdään Paalutusohje 2011 osan 2 kohdan 6.3.1.1 mukaisesti.

Mikäli kuorma-siirtymäkuvaajassa ei havaita selvää murtoa, valitaan murtokriteeriksi SFS-EN 1997-1 mukainen painuma, joka vastaa 10 % paalun kärjen halkaisijasta (kuva 7).

**Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä
paalujen koekuormituksen menetelmäkuvaukset**

Kuva 7. Paalun geoteknisen murtokestävyyden määrittäminen staattisen koekuormituksen kuorma – siirtymäkuvaajasta.

Kun koekuormitus on suoritettu, rakennuttajalle tulee viivytyksettä luovuttaa raportti, jossa on koekuormituksen tulokset ja kaikki yksityiskohtaiset tiedot koekuormitetusta paalusta ja sen sijainnista sekä yhteenveto maaperäolosuhteista. Tulokset esitetään graafisessa ja tarvittaessa numeerisessa muodossa.

Lähteet

Kairausopas IV, Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen. Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry. Helsinki 1987.

Lehtonen, V. Ratapenkereen sörrotuskokeen instrumentointi ja analysointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2010. Helsinki 2010.

Luomala, H. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. Helsinki 2010.

Ryhänen, A., Ylönen, S., Luomala, H., Kolisoja, P., Mäkelä, H., Halkola, H. 2007. Continuous Ground Movement Measurements. Geotechnical Engineering in Urban Environments. Madrid 2007. Vol. 2.

Savikurki, S. Ratapenkereen stabiiliteettiin liittyvät seurantamittaukset ja niiden prosessointi. Diplomityö, Aalto-yliopiston Teknillinen Korkeakoulu. Espoo 1987.

Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 2100002-01.

Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-255-641-7

www.liikennevirasto.fi